

一种适用于降低叠加噪声峰均比的方法

李 黎¹ 张建功¹ 翟笃文¹

LI Li ZHANG Jiagong ZHAI Duwen

摘 要

声干扰器作为一种噪声干扰对抗器材,可以大幅度提高敌方探测声呐的接收背景,其中窄带噪声干扰的带内能量更为集中,干扰效果显著。随着作战要求不断提高,对功放的发射源级提出了更高的要求,低峰均比噪声可以有效保障功放工作在线性区。文章提出了一种适用于降低叠加噪声峰均比的方法,通过对噪声进行延时叠加后再限幅滤波,仿真结果证明该方法可以有效降低叠加噪声的峰均比,且算法复杂度低,易于工程实现。

关键词

多带宽;窄带噪声干扰;降低峰均比

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.08.023

0 引言

声干扰器是一种用于提高敌方探测声呐接收背景的水声对抗器材^[1],主要分为宽带噪声干扰和窄带噪声干扰两种干扰方式,窄带噪声干扰是产生中心频率与敌方探测声呐信号一样,带宽可覆盖敌方探测声呐信号带宽的干扰噪声,其干扰带宽更窄,能量更为集中^[2],按干扰带宽可分为固定带宽、可选式多带宽、自适应带宽,固定带宽是通过预存一组带宽的窄带噪声,根据敌方探测信号中心频率移频产生窄带噪声进行对抗;可选式多带宽瞄频噪声干扰通过预存多组不同带宽的窄带噪声,根据带宽估计值选择一个可覆盖敌方探测声呐信号带宽且带宽最窄的噪声样本进行干扰对抗;自适应带宽是根据敌方探测信号中心频率和带宽估计值实时产生窄带噪声输出。

多声呐协同探测是目前的发展趋势^[3],对干扰器而言,当敌方探测声呐个数越多时,对抗的信号越多,多组预存的窄带噪声叠加后会大幅度提高峰均比,过高的峰均比会导致功放处于非线性区造成信号失真,不仅会恶化系统性能,而且还会造成带外的频谱泄露,影响接收性能^[4]。因此,必须保证输出噪声的峰均比尽可能小。

本文针对可选式多带宽瞄频噪声干扰时,多组窄带噪声叠加后峰均比高的问题,提出了一种适用于降低叠加噪声峰均比的方法,主要通过对多组噪声信号延时后再进行叠加,对叠加后的噪声信号限幅滤波,仿真结果表明该方法可有效降低瞄频噪声峰均比。

1 理论分析

1.1 多组噪声叠加原理

预存的噪声为窄带高斯白噪声,当高斯白噪声通过以 w_c 为中心角频率的窄带系统后,就可形成频谱局限在 $\pm w_c$ 附近很窄的频率范围内,包络和相位做缓慢随机变化的窄带高斯白噪声,其表达式为:

$$n(t) = \rho(t) \cos[w_c t + \varphi(t)] \quad (1)$$

式中: $\rho(t)$ 为噪声的随机包络; $\varphi(t)$ 为噪声的随机相位。

将式(1)进行展开计算,可得:

$$n(t) = n_I(t) \cos(w_c t) - n_Q(t) \sin(w_c t) \quad (2)$$

$n_I(t)$ 为噪声的同相分量,即:

$$n_I(t) = \rho(t) \cos(\varphi(t)) \quad (3)$$

$n_Q(t)$ 为噪声的正交分量,即:

$$n_Q(t) = \rho(t) \sin(\varphi(t)) \quad (4)$$

均值为零的窄带高斯白噪声 $n(t)$,假定它是平稳随机过程,则它的同相分量和正交分量也是平稳随机过程,且均值也都为零,方差也相同,即:

$$E[n(t)] = E[n_I(t)] = E[n_Q(t)] = 0 \quad (5)$$

$$D[n(t)] = D[n_I(t)] = D[n_Q(t)] = \sigma^2 \quad (6)$$

式中: σ^2 为噪声方差(即功率)。

随机包络 $\rho(t)$ 服从瑞利分布,即:

$$f(\rho) = \frac{\rho}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right) \quad \rho \geq 0 \quad (7)$$

相位 $\varphi(t)$ 服从均匀分布,即:

$$f(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (8)$$

1. 上海船舶电子设备研究所 上海 201108

峰均比为一时间内信号的最大峰值功率与平均功率的比值^[5]。假设 N 个窄带噪声叠加后形成 Y ，由于叠加的窄带噪声相互独立，叠加后噪声的平均功率相当于每个采样点的幅值平方求和后再取平均值，可表示为：

$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |Y(n)|^2 = E[Y(n)^2] = D[Y(n)] \quad (9)$$

最大峰值功率为最大峰值的平方，可表示为：

$$P_{\text{max}} = \max_{0 \leq n \leq N-1} |Y(n)|^2 \quad (10)$$

N 个窄带噪声叠加后的峰均比为：

$$R_{\text{PAPR}} = \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} |Y(n)|^2}{D[Y(n)]} \quad (11)$$

叠加的信号服从同一分布且相互独立，假设第 n 个信号的均值为 0，方差为 σ_n^2 ，根据中心极限定理，随机变量如果是由大量独立的而且均匀的随机变量相加而成，那么它的分布将近似于正态分布。因此，叠加后的信号 $Y(n)$ 也服从均值为 0，方差为 σ_Y^2 的正态分布。

由式 (7) 可知信号包络瑞利分布，假设叠加后的信号幅值为 a ，瞬时功率为 x ，则：

$$x = a^2 \quad (12)$$

$$a = \sqrt{x} \quad (13)$$

式 (13) 的导数为：

$$h'(a) = \frac{1}{2\sqrt{x}} \quad (14)$$

瞬时功率 x 的概率密度为：

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{\sqrt{x}}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(\sqrt{x})^2}{2\sigma^2}\right) \times h'(a) \quad , x \geq 0 \\ &= \frac{\sqrt{x}}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(\sqrt{x})^2}{2\sigma^2}\right) \times \frac{1}{2\sqrt{x}} \\ &= \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{x}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

一般采用 CCDF (互补累积分布函数) 来体现峰均比的统计特性，CCDF 的定义为信号峰均比大于某门限值 ε 的概率^[6]，其表达式为：

$$F_{\text{CCDF}} = P\{R_{\text{PAPR}} > \varepsilon\} = 1 - P\{R_{\text{PAPR}} \leq \varepsilon\} \quad (16)$$

式中： $P\{\cdot\}$ 为求概率运算，结合瞬时功率的概率密度对叠加后信号的互补累积分布函数进行推导：

$$\begin{aligned} F_{\text{CCDF}} &= P\left\{\frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} |Y(n)|^2}{D[Y(n)]} > \varepsilon\right\} \\ &= P\left\{\max_{0 \leq n \leq N-1} |Y(n)|^2 > \varepsilon \cdot \sigma_Y^2\right\} \\ &= 1 - P\left\{\max_{0 \leq n \leq N-1} |Y(n)|^2 \leq \varepsilon \cdot \sigma_Y^2\right\} \\ &= 1 - \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon}{2}}\right)^N \end{aligned} \quad (17)$$

式中： N 为叠加信号的个数。

根据式 (17) 绘制不同个数噪声叠加后的互补累积分布函数曲线，结果如图 1 所示。由图 1 可知，随着叠加噪声个数的增多，叠加噪声个数 N 越大，CCDF 也越大，叠加噪声的峰均比超过设定门限值的概率会增加。因此，叠加的噪声个数越多，叠加后的噪声峰均比越高，在输出源级一定的情况下，叠加的噪声个数越多对发射系统的功率要求越高，需要对叠加后的噪声峰均比进行抑制。

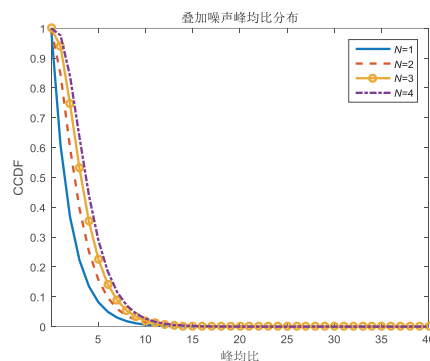


图 1 叠加噪声峰均比分布图

1.2 降低叠加后窄带噪声峰均比的方法

限幅滤波法可以有效地降低信号的峰均比，首先对信号进行限幅操作，将输入信号 $Y(n)$ 超过门限 A 的采样点的幅度限制在门限值，而相位保持不变，即：

$$Z(n) = \begin{cases} Y(n) & |Y(n)| \leq A \\ A \cdot e^{j\theta(n)} & |Y(n)| > A \end{cases} \quad (18)$$

式中： A 为设定的限幅门限； $Z(n)$ 为经过限幅后的信号； $\theta(n)$ 为 $Y(n)$ 的相位。

通过限幅操作可以控制信号的最大峰值，由于限幅为非线性操作，会改变噪声的谱结构，产生带内失真和带外辐射，在限幅后需要对信号进行滤波，去除带外产生的干扰，本文结合限幅滤波法针对噪声叠加后的特点，提出了一种有效降低叠加噪声峰均比的方法，算法流程图如图 2 所示。

预存的多组窄带噪声采用同一组噪声样本生成，相关程度较高，首先对多组噪声延时后进行叠加，因此在叠加时对各组窄带噪声进行延时处理后再叠加以降低相关性。

对叠加后的窄带噪声进行幅值调整后再进行限幅运算，因限幅会改变噪声的谱结构，将带来多个窄带噪声频率之间相互混合，因此产生与窄带噪声同频同带宽的滤波器对限幅后的窄带噪声进行滤波，滤除因限幅运算带来的其他频率分量，整个算法中仅需一次限幅滤波就可以大幅度降低叠加信号的峰均比。



图 2 算法流程图

2 仿真分析

2.1 延时叠加效果仿真

为了验证延时叠加的可行性,进行仿真验证,分别绘制噪声直接叠加后的时域图和噪声经过延时后再叠加的时域图,如图3所示。仿真条件: $N=4$,窄带噪声中心频率分别为25、26、27、28 kHz,延时时间分别为1、1.5、2、3 ms,带宽皆为500 Hz。

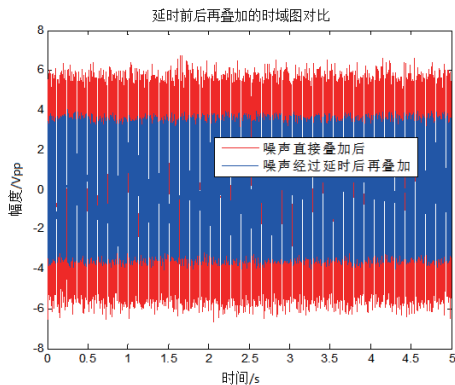


图3 延时叠加效果对比

图3为5个窄带噪声延时叠加效果对比图,由图3可知噪声直接叠加后的峰值范围为(-6.7,6.7)。经过延时后叠加的信号峰值位于(-4,4)。因此,经过延时后再叠加可以有效降低噪声相关性,降低叠加噪声的峰均比。

2.2 限幅滤波效果仿真

限幅滤波可以有效降低叠加后噪声峰均比,分别绘制采用延时叠加信号进行限幅滤波后的噪声时域图、直接对叠加信号进行限幅滤波后的噪声时域图,如图4所示。仿真条件: $A=1$, $N=4$,窄带噪声中心频率分别为25、26、27、28 kHz,带宽为500 Hz。

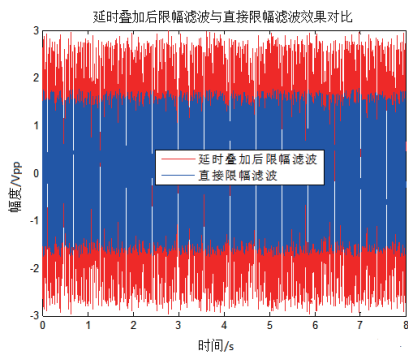


图4 限幅滤波效果对比

图4为延时叠加限幅滤波和直接限幅滤波的对比图,通过对比可以发现经过升幅值限幅滤波后的噪声峰值较小,直接限幅滤波后的噪声峰均比为56.2,经过延时叠加限幅滤波后的噪声峰均比为38.3,因此与直接限幅滤波相比,经过延时叠加再限幅滤波的噪声峰均比更低。

进行1000次蒙特卡洛试验,用峰均比平均值作为衡量峰均比降低的依据,改变窄带噪声的中心频率和叠加噪声个数,统计噪声直接叠加后的峰均比平均值、噪声直接叠加后进行一次限幅滤波后的峰均比平均值、采用本文算法将噪声延时叠加后再经过升幅值限幅滤波后的峰均比平均值,得到表1结果。

表1 叠加噪声个数不同时的峰均比抑制效果

噪声样本个数	叠加后噪声峰均比	直接限幅滤波后噪声峰均比	本文算法处理后噪声峰均比
2	45.6	25.6	17.8
3	67.4	37.6	28.2
4	83.7	54	35.6

通过上述仿真结果可知,随着叠加噪声个数的增大,叠加后的噪声峰均比也随之增大,通过本文算法处理后噪声峰均比更小。

3 结论

针对目前多组噪声叠加后的峰均比高的问题,本文提出适用于叠加噪声干扰的降低峰均比的方法,仿真结果表明通过对延时叠加后的窄带噪声进行限幅滤波后,可以有效降低叠加噪声的峰均比,保护功放,且算法复杂度低,易于工程实现。

参考文献:

[1]Submarine sonar system[EB/OL]. [2025-01-25].<https://www.thalesgroup.com/en/markets/defence-and-security/naval-forces/underwater-warfare/submarine-sonar-suites>.
[2]曾茂生,彭欣,修继信.快速窄带窄带干扰技术分析[J].舰船电子对抗,2011,34(2):17-18.
[3]施丹华,胡必楠,黄俊希.水声对抗器材发展及其趋势分析[J].舰船科学技术,2020,42(9):174-180.
[4]冒燕,彭世蕤,王冰切,等.峰均比改善对压制干扰信号的应用效果分析[J].空军预警学院学报,2014,28(6):391-394.
[5]宋肇伟.峰均比及其改进技术[J].移动通信,2009,33(2):14-17.
[6]何煦,张夸赞,周焚江.多目标干扰信号峰均比抑制方法的设计和实现[J].通讯世界,2024,31(3):33-35.

【作者简介】

李黎(1992—),女,广西全州人,硕士研究生,工程师、信号处理设计师,研究方向:水下声学对抗技术。

(收稿日期:2025-04-28 修回日期:2025-08-11)